

## 基于生理发育时间的水稻发育期预测方法

张明达<sup>1</sup>, 胡雪琼<sup>1</sup>, 朱涯<sup>2</sup>, 张加云<sup>1</sup>, 何雨琴<sup>1</sup>, 徐梦莹<sup>1</sup>, 朱勇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>云南省气候中心, 昆明 650034; <sup>2</sup>云南省大气探测技术保障中心, 昆明 650034。)

**摘要:** 水稻发育期模型研究是开展现代农业气象服务工作的基础。基于作物生理发育时间守恒原理, 综合考虑温度和日长因子对水稻发育期的影响, 利用云南省12个农气观测站2011—2014年水稻发育期观测和地面气象观测资料, 分别构建并验证了适用于籼稻种植区和粳稻种植区的发育期预报模型。结果表明, 2套模型在全发育期和各发育阶段的预报值与观测值模拟效果总体较好, 平均全发育期 *RMSE* 值为7.47, *RE* 值为7.99%, 粳稻模型和籼稻模型的 *RE* 值分别为6.49%和9.5%, 粳稻区模拟效果优于籼稻区。模型生物学意义明确、参数通用性强, 适用于农业气象业务服务中水稻发育期预测, 具有推广应用价值。

**关键词:** 水稻; 发育期模型; 生理发育时间; 农业气象服务

中图分类号: S165

文献标志码: A

论文编号: casb16080146

### Forecasting Method of Rice Phenology Stage Based on Physiological Development Period

Zhang Mingda<sup>1</sup>, Hu Xueqiong<sup>1</sup>, Zhu Ya<sup>2</sup>, Zhang Jiayun<sup>1</sup>, He Yuqin<sup>1</sup>, Xu Mengying<sup>1</sup>, Zhu Yong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Yunnan Climate Center, Kunming 650034; <sup>2</sup>Yunnan Atmospheric Exploration Technology Security Center, Kunming 650034)

**Abstract:** Rice phenological models are the bases of modern agro-meteorological service. Based on the conservation principle of crop physiological development stage, considering the influences of climatic variables (i.e. temperature, sunshine hours and so on) on rice phenological stage, we built and verified the phenological forecasting model which was suitable for *indica* rice and *japonica* rice planting region, using the observational data during rice phenology stage and ground meteorological data (2011–2014) from 12 agro-meteorological stations of Yunnan. The results showed that: both prediction and observation value of *indica* and *japonica* rice phenological prediction models had good performance with averaged root-mean-square error (*RMSE*) of 7.47 and relative error (*RE*) of 7.99%; the relative error (*RE*) was higher in *indica* rice phenological prediction model (9.5%) than that in *japonica* rice phenological prediction model (6.49%), implying better simulation in *japonica* rice region than that in *indica* rice region. Therefore, the crop phenological model is biologically based and of universal parameters, which is applicable for agro-meteorological service.

**Key words:** rice; phenological model; physiological development period; agro-meteorological service

### 0 引言

云南是高原山地杂交水稻种植区, 特有的低纬高原气候在全国杂交水稻种植范围内属于最佳区域之一<sup>[1]</sup>。在独特的立体型气候条件下, 云南水稻生产较

其他种植区具有以下特殊性: 植株偏矮、穗长偏短、叶片数偏多, 发育期较长, 有效穗数、穗粒数增多, 着粒密度增大, 叶面积大且衰减缓慢, 结实率、千粒重高, 单产高, 产量居全国之冠, 其中最具代表性的就是屡次刷新

**基金项目:** 西南区域项目“川滇高原山地水稻盛夏低温冷害及其对策研究”(2013-2); 云南省气象局预报员技术开发专项项目“云南省大宗粮食作物动态产量预报技术研究”(YB201205)。

**第一作者简介:** 张明达, 男, 1982年出生, 吉林吉林人, 高工, 硕士, 主要从事农业气象研究。通信地址: 650034 云南省昆明市西昌路77号 云南省气候中心, E-mail: rockerdada@163.com。

**通讯作者:** 朱勇, 男, 1962年出生, 云南昭通人, 正研级高工, 本科, 主要从事农业气象研究。通信地址: 650034 云南省昆明市西昌路77号 云南省气候中心, E-mail: windzy78@163.com。

**收稿日期:** 2016-08-31, **修回日期:** 2017-04-24。

全国小面积高产纪录的云南省永胜县涛源乡<sup>[2]</sup>。受地理、气候及品种差异的影响,云南各地的水稻种植海拔梯度变化明显,发育期、植物学性状、产量及构成因素等均有显著差异<sup>[3]</sup>。云南杂交水稻种植类型主要以粳稻和籼稻为主,稻作区以海拔 1400 m 为界分为粳稻区,粳籼稻混种区,籼稻区。

作物发育期模型既是表征作物发育阶段和速度的时间标识,也是作物干物质分配与积累、养分转移、吸收和存储,产量和品质等模拟的基础。结合发育期预测,为田间管理,适时引种,各发育期的农业气象条件分析和预报提供依据。水稻发育期模型是评估农业适应气候变化的主要技术手段,在应对气候变化、生产管理措施等方面也具有关键作用<sup>[4-5]</sup>,气候变化使水稻发育期缩短天数在 3.5 天以上,局部地区甚至缩短 6~8 天<sup>[6-7]</sup>。受气候变暖趋势加剧及气候带变化的影响,云南水稻种植的气候资源格局变化剧烈,热量资源呈明显增加趋势,区域性差异增大<sup>[8-9]</sup>。

发育期模型以气象因子为环境驱动变量,运用数学物理方法和计算机技术,对作物发育期内主要发育阶段及其与气象因子的关系进行动态模拟,进而实现作物发育期预测。水稻发育期模型的研究早有开展,有效积温法(Growing Degree Days, GDD)是较早作为预报作物发育期模型的方法<sup>[10-11]</sup>,众多科研工作者在水稻发育期模型研究方面也取得了很多的成果<sup>[12-14]</sup>。然而大多数的模型都存在着参数过多、机理复杂、调参繁琐等问题,特别是受常规农业气象观测中资料的数量和时效等诸多因素的限制,作物发育期模型的业务化应用一直存在相当的难度<sup>[15]</sup>。综合考虑作物品种基因型、温度和日长等影响因子的发育期模型更加准确合理<sup>[16]</sup>。

生理发育时间(Physiological Developmental Time, PDT)指在最适温、光条件下,作物完成各发育期所需要的最短时间。作物在最适温、光条件下生长 1 日被定义为 1 个生理发育日,当非最适条件时,1 个生理发育日小于 1 个自然日,每个发育期所需的生理发育时间为该发育期每日相对生理发育时间的累加。生理发育时间法使用恒定的生理尺度,解决了不同气候条件下,因发育期时间和长短不同,开展发育期模拟和预测的困难,在国内外已广泛用于大田作物和温室作物的发育期模拟预测<sup>[17-20]</sup>。

本研究依据生理发育时间法对云南水稻发育期进行模型模拟,在籼稻种植区和粳稻种植区分别建立了 2 套适用于云南水稻种植及生产的发育期模型,研究生理热效应和光周期效应对水稻发育期进度的作用机

理,掌握气象条件对水稻种植生产的影响,以期提升气象为云南高原特色农业服务能力,为气象部门指导和服务高原特色农业生产提供依据和支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

研究资料取自云南省气象局水稻生育状况观测记录年报表,该资料包含水稻的生长发育状况,各发育期的出现时间,气象灾害、病虫害及田间管理活动等情况,定期进行叶面积及各部位干重测定,观测时设置 4 个小区(重复),最终的项目记录值为 4 个小区的平均值。

水稻发育期观测主要记录移栽、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟和成熟的普遍期日期(第 1 次≥50%的植株达到标准的日期)。结合云南特殊的地理、气候及海拔差异,兼顾主要稻作种植区的分布及气候特点,一般海拔在 800 m 以下区域多种植双季稻,在高于 2000 m 区域气候适宜性差,种植面积较小,是水稻生产分布的极限地区,因此剔除了上述海拔地区的站点。

研究站点的选择以海拔 1400 m 为分界线,将海拔在 800~1400 m 作为籼稻模型研究区,将 1400~2000 m 作为粳稻模型研究区。

模型建立及验证所用气象数据取自观测样地附近气象站,资料时段为 2011—2014 年,其中 2011—2012 年资料用于建立模型,2013—2014 年资料用于验证模型。各观测站的气候带、地理信息及种植品种类型见表 1。

### 1.2 生理热效应

生理热效应(Relative Thermal Effectiveness, RTE)代表作物在实际温度条件下与在最适温度条件下生长单位时间的比例,由作物发育过程中对温度的非线性反应决定。各生理发育期热效应状况对水稻生长及干物质累积都有一定的影响,尤其是在云贵高原地区,在拔节孕穗期和抽穗开花期的热效应对水稻产量影响更加明显<sup>[21]</sup>。温度作为决定发育速度的主要因子之一<sup>[22]</sup>,对发育速率的影响模式通常有折线型、β 曲线型、Logistic 曲线型等形式,本研究采用三段线性函数模型来计算每日生理热效应 RTE,见公式(1)。

$$RTE(T) = \begin{cases} 0 & (T < T_b) \\ (T - T_b)/(T_{ob} - T_b) & (T_b \leq T < T_{ob}) \\ 1 & (T_{ob} \leq T \leq T_{ou}) \dots (1) \\ (T_m - T)/(T_m - T_{ou}) & (T_{ou} < T \leq T_m) \\ 0 & (T_m < T) \end{cases}$$

式中, RTE 表示当温度为  $T$  时的相对热效应;  $T_b$  为发育期最低温度下限,低于这一温度时,发育速率为 0;  $T_m$

表1 观测点地理位置及水稻种植品种

地市	气候带	纬度	经度	海拔/m	2011年	2012年	2013年	2014年
芒市	南亚热带	24°26'	98°35'	913.8	川香优6号	深优9734	德香4103	宜香优2115
耿马	南亚热带	23°33'	99°24'	1104.9	冈优118	两优2186	宜香3551	宜香3551
江城	南亚热带	22°35'	101°51'	1119.5	仙优205	宜香3003	宜香4106	宜香4106
景东	南亚热带	24°28'	100°52'	1162.3	莲花8号	Q优6号	万优2号	万优2号
文山	南亚热带	23°23'	104°15'	1271.6	99优-4	云香527	宜香725	宜香527号
蒙自	南亚热带	23°23'	103°23'	1300.7	内香8518号	2优11号	宜香707号	宜香707号
保山	中亚热带	25°07'	99°11'	1652.2	滇系15号	滇系15号	云粳15号	云粳15号
玉溪	中亚热带	24°20'	102°33'	1716.9	楚粳28号	楚粳29	云粳34号	塔粳一号
楚雄	中亚热带	25°02'	101°33'	1824.1	楚粳28号	楚粳28号	楚粳28号	楚粳28号
陆良	北亚热带	25°02'	103°40'	1841.0	楚粳26号	楚粳26号	楚粳27号	楚粳24号
昆明	北亚热带	25°01'	102°41'	1892.4	合系	合系	合系	合系
大理	北亚热带	25°42'	100°11'	1990.5	滇杂46号	合榆5号	滇杂46号	滇杂46号

为发育期最高温度上限,超过这一温度时,水稻停止发育;  $T_{ob}$  为发育期最适温度下限,  $T_{ou}$  为发育期最适温度上限。考虑到农业气象观测实际和建立业务化预报模型的需求,选取移栽、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟和成熟期6个水稻发育阶段进行建模研究。结合云南高原低纬度高海拔地区气候资源特征和杂交水稻种植特点,参考云南已有研究<sup>[23]</sup>,平均气温在15℃以下时,水稻植株无法正常生长;平均气温在30℃以上时,制约高产群体的发展,并对穗分化和抽穗开花产生抑制,因此将15℃和30℃定为水稻适宜生长的最低温度和最高温度,水稻各发育期的三基点温度见表2。

表2 水稻各主要发育期的三基点温度 ℃

水稻主要发育期	最低温度 $T_o$	最适温度		最高温度 $T_m$
		$T_{ob}$	$T_{ou}$	
移栽—分蘖	15	18	20	30
分蘖—拔节	15	19	22	25
拔节—孕穗	15	21	25	28
孕穗—抽穗	15	22	25	30
抽穗—乳熟	18	22	25	30
乳熟—成熟	15	19	25	30

### 1.3 光周期效应

水稻是短日照作物,光周期效应对全发育期均有影响,在短日照条件下发育速率较快,长日照条件下发育速率变缓。云南大部地区种植杂交稻为一季中稻,其中籼稻的出穗不受日照长短的影响,粳稻抽穗最适日长为12.5 h,临界日长为14 h<sup>[24]</sup>。光周期效应(Relative Photoperiod Effectiveness, RPE)表示作物在

实际日长条件下和在最适日长条件下生长时间的比例。光周期效应可由实际日长、临界日长和最适日长来计算,当实际日长小于最适日长时,光周期效应为1;当实际日长在最适日长和临界日长之间时,光周期效应随日长增加而线性降低;当实际日长大于临界日长时,光周期效应为0。如公式(2)所示。

$$RPE = \begin{cases} 1 & (DL \leq DL_o) \\ \frac{DL - DL_o}{DL_c - DL_o} & (DL_o < DL \leq DL_c) \dots\dots (2) \\ 0 & (DL_c < DL) \end{cases}$$

式中,  $DL_c$  为临界日长,取14 h;  $DL_o$  为最适日长,取12.5 h;  $DL$  为实际日长。

一年中任意一天的实际日长  $DL$  的计算公式为(3)。

$$DL = 12 \times [1 + (2/\pi) \times \sin^{-1}(a/b)] \dots\dots\dots (3)$$

其中  $a = \sin \lambda \sin \delta$ ,  $b = \cos \lambda \cos \delta$ ,  $\sin \delta = -\sin(\pi \times 23.45/180) \times \cos[2\pi \times (DAY + 10)/365]$ ,  $\cos \delta = 1 - \sin \delta \times \sin \delta$ ,  $DAY$  是一年中的日序,  $\lambda$  为地理纬度,  $\delta$  为太阳赤纬(在 $\pm 23.45^\circ$ 之间变化)。

水稻植株从移栽期至成熟期,每日的生理效应  $RPDT$  由每日生理热效应  $RTE$  和每日光周期效应  $RPE$  的相互作用共同决定,如公式(4)所示。每日生理效应的累积则形成了生理发育时间  $PDT$ , 水稻全发育期生理发育时间  $PDT$  由每日生理效应  $RPDT$  累积计算得出。

$$RPDT = RTE \times RPE \dots\dots\dots (4)$$

### 1.4 模型检验方法

依据回归估计标准误差法 RMSE(Root Mean Square Error)和相对误差法 RE(Relative Estimation Error)对模



型拟合值与实际观测值的符合度进行检验。其中, *RMSE*值越小,拟合值与实测值的一致性越高,模型预测准确度越高;当 *RE*值小于10%时,拟合值与实测值一致性非常好, *RE*值为10%~20%之间为较好, *RE*值为20%~30%之间模型模拟效果一般, *RE*值大于30%表明拟合值与实测值偏差大,模拟效果较差。 *RMSE*和 *RE*的计算公式如公式(5)、(6)所示:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$RE = RMSE \times \frac{100}{\sigma} \dots\dots\dots (6)$$

式中, *SIM<sub>i</sub>*、*OBS<sub>i</sub>*和 *N*分别表示模型拟合值、实测值和样本总数, *i*为实测值和拟合值的样本序号,  $\sigma$ 为实测值的平均值。

### 1.5 统计分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件对日平均气温、日长数据进行处理和分析,获得每日生理热效应和光周期效应,再进行逐日累加,获得各发育期及全发育期的生理发育时间,并对所建立的模型进行 *RMSE*和 *RE*检验,并制图分析各发育期内,各观测站实测值与模拟值的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型参数的建立

针对云南水稻的种植现状和品种特点,采用气象站逐日平均气温数据、日长数据,利用2011—2012年的观测数据,代入公式(1)~(4)分别计算移栽、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟、成熟6个发育阶段所需生理热效应时间和光周期效应时间,分别获得适用于云南省北

部粳稻种植区和南部籼稻种植区的各发育期及全发育期累积生理发育时间,计算结果见表3。对比粳稻区和籼稻区各发育期生理发育时间来看,粳稻全发育期所需时间大于籼稻10天以上,集中表现在发育前期的移栽—分蘖期及分蘖—拔节期,分别偏多了6天和11天;在发育中后期生理发育时间籼稻稍多于粳稻,但差别并不明显,分别为拔节—孕穗期偏多1天,孕穗—抽穗期偏多1天,抽穗—乳熟期偏多2天;在乳熟—成熟期内生理发育时间差别最小,不足1天。从各发育期用时来看,孕穗—抽穗期所需生理发育时间最短,拔节—孕穗期与抽穗—乳熟期所需时间相近,分蘖—拔节期及乳熟—成熟期所需时间最多。

### 2.2 模型的检验

利用2013—2014年水稻发育期资料及逐日平均气温和日长数据,根据公式(1)~(4),计算云南24站次完成各发育期生理热效应和光周期效应及累积生理发育时间。结合2套生理发育时间模型的预测效果进行检验,对比模型拟合值与实测值的差异,根据公式(5)~(6)进行误差检验,计算模拟值与实测值之间的 *RMSE*值和 *RE*值,结果如表4所示。

对比统计误差可见,使用生理发育时间法对不同稻区的水稻发育期模拟效果总体较好,平均全发育期 *RMSE*值为7.47, *RE*值为7.99%,且模拟效果粳稻区优于籼稻区,拟合值与实测值一致性非常好,2套生理发育时间模型在全发育期模拟均能达到较好的预测效果,2年平均 *RE*值分别为6.49%和9.5%,粳稻模型效果优于籼稻模型。对比各发育期来看,粳稻模型在分

表3 水稻各发育期生理发育期时间(PDT)

	移栽—分蘖	分蘖—拔节	拔节—孕穗	孕穗—抽穗	抽穗—乳熟	乳熟—成熟	全发育期
粳稻区	16.14444	27.30389	13.08847	8.907379	13.80542	19.83146	99.08106
籼稻区	10.01278	16.86909	14.31436	9.963206	15.45153	19.1216	85.73256

表4 2套发育期模型在不同发育期内的预测误差

水稻主要发育期	粳稻2013		粳稻2014		籼稻2013		籼稻2014	
	<i>RMSE</i>	<i>RE</i> %	<i>RMSE</i>	<i>RE</i> %	<i>RMSE</i>	<i>RE</i> %	<i>RMSE</i>	<i>RE</i> %
移栽—分蘖	3.40	20.70	3.38	24.80	2.88	25.22	2.06	20.82
分蘖—拔节	3.54	13.55	5.22	18.89	5.42	27.46	4.28	22.41
拔节—孕穗	3.89	28.75	2.31	18.95	2.40	16.75	2.69	18.98
孕穗—抽穗	1.49	17.58	1.59	18.55	2.50	25.25	2.39	28.74
抽穗—乳熟	3.50	23.08	2.51	16.38	4.04	22.06	3.06	19.88
乳熟—成熟	4.82	26.17	5.83	25.02	5.06	30.82	7.73	35.07
全发育期	5.94	6.06	6.96	6.92	6.91	7.67	10.07	11.33

蘗—拔节期和孕穗—抽穗期模拟效果较好,在移栽—分蘗期和乳熟—成熟期模拟效果较为一般;籼稻模型在拔节—孕穗期和抽穗—乳熟期模拟效果较好,在移栽—分蘗期、分蘗—拔节期及孕穗—抽穗期模拟效果较为一般,仅在乳熟—成熟期  $RE$  值大于 30%,拟合值与实测值偏差大,模拟效果不理想。

从空间分布来看(见图 1),在籼稻种植区的景东站累积生理发育时间离散度稍偏大,在粳稻种植区的昆明站累积生理发育时间离散度较大。主要原因是播期和移栽期的提前(推迟)引起发育期延长(缩短),2 个站点海拔和纬度均较高,水稻移栽期较早于其他站偏早较多(景东站偏早 1 个半月,昆明站偏早半个月)<sup>[25]</sup>,导致移栽—拔节期累积生理发育时间延长较大。

### 3 结论与讨论

水稻在云南全省绝大部分地区都有种植,地理气

候条件的差异导致各种植区的光、温、水等气象因子变化较大,导致各地的水稻发育期进度存在较大差异,严重限制了气象部门开展针对性较强的高原特色农业气象服务。水稻生长发育期的识别,有助于提高水稻种植生产效率,合理应对气候变化对水稻生产的影响,准确预报水稻发育期对于开展水稻气象灾害预警防御和提出生产管理措施建议都至关重要。目前,在云南省甚至全国的农业气象服务领域,水稻发育期预报业务都处于摸索阶段,加强气象为农服务的前瞻性,对确保水稻稳产、高产、质优都有十分重要的意义,更有助于提高高原特色农业气象服务,预知作物当前发育进度,准确把握发育时间,进行针对性灾害预警和管理决策服务。

生理发育时间法基于生理发育时间恒定原理,在光温同步变化的条件下,综合了不同温度的热效应影响,考虑了光周期效应对短日照作物的抑制作用,模型

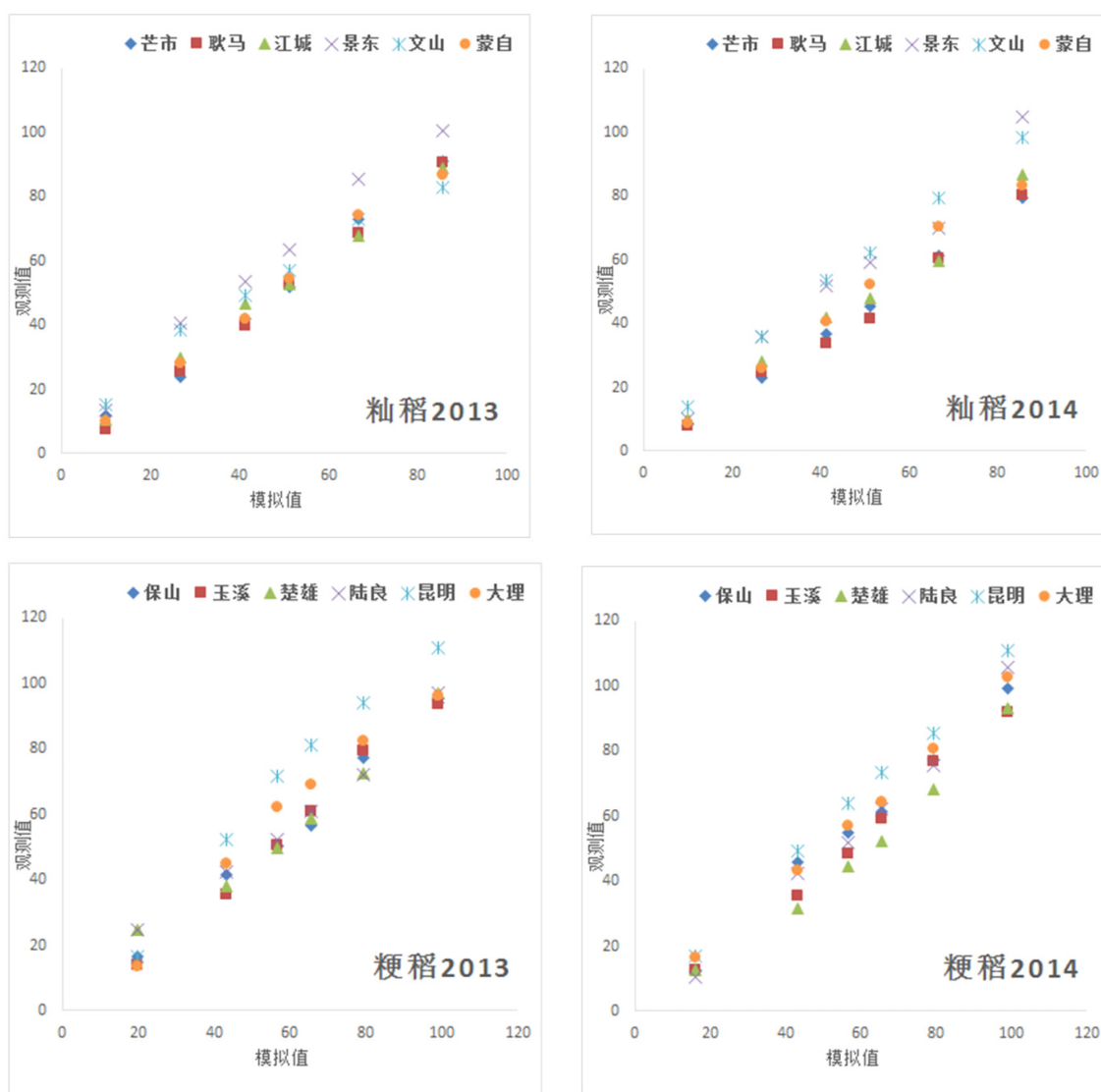


图 1 水稻各发育期生理发育时间模拟值与观测值比较

机理性较好,解释性较强,获得了理想的模拟效果。利用云南省连续4年水稻发育期观测资料和同期气象要素观测资料,分别建立并验证了粳稻区和籼稻区2套发育期预测模型,对比模拟值与实测值来看,数据相对误差小,一致性高,模型模拟效果好,可以在农业气象业务中开展推广应用。结合农用天气预报技术,模型可以依据滚动天气预报进行中短期发育进程的预测,为农事活动提供生产措施建议,提前预防和减轻病虫害及气象灾害。在方法研究和资料选择的过程中紧扣业务需求和资料现状,对影响水稻生长发育速度的主要因子进行筛选分析,突出关键因子,并在常规观测业务中易于获取,适用于日常业务实时滚动运行的全省水稻发育期预报模式,为准确预测各种植区水稻发育期进度提供了理论支撑和技术保障,模型使用参数少,易获取,适用性强,通用性好。

### 参考文献

- [1] 朱勇,段长春,王鹏云.云南杂交水稻种植的气候优势及区划[J].中国农业气象,1999,20(2):21-34.
- [2] 张仕颖,夏运生,史静,等.超高产生态区水稻产量成因研究进展[J].中国农学通报,2014,30(18):14-17.
- [3] 谭亚玲,洪汝科,陈金凤,等.海拔高度对不同水稻品种生长的影响研究[J].种子,2009,28(7):27-30.
- [4] 刘桃菊,殷新佑,戚昌瀚,等.气候变化与水稻生长发育及产量形成关系的模拟研究[J].应用生态学报,2005,16(3):486-490.
- [5] 宋艳玲,刘玲,钟海玲.气候变暖对我国南方水稻可种植区的影响[J].气候变化研究进展,2011,7(4):259-264.
- [6] 万素琴,刘志雄,刘敏,等.未来气候变化对华中地区中稻产量影响的模拟[J].生态学杂志,2012,31(11):2788-2796.
- [7] 张建平,赵艳霞,王春乙,等.气候变化对我国南方双季稻发育和产量的影响[J].气候变化研究进展,2005,1(4):151-156.
- [8] 姜晓剑,汤亮,刘小军,等.中国主要稻作区水稻生产气候资源的时空特征[J].农业工程学报,2011,27(7):238-245.
- [9] 徐梦莹,朱勇,胡雪琼,等.近40年云南水稻热量资源时空变化特征[J].安徽农业科学,2016,44(6):228-233.
- [10] Teasdale J R, Devinea T E, Mosjidib J A, et al. Growth and development of hairy vetch cultivars in the Northeastern United States as influenced by planting and harvesting date[J].Agronomy Journal,2004,96:1266-1271.
- [11] 徐其军,汤亮,顾东祥,等.基于形态参数的水稻根系三维建模及可视化[J].农业工程学报,2010,26(10):188-194.
- [12] 高亮之,金之庆,黄耀,等.水稻计算机模拟模型及其应用之一,水稻钟模型-水稻发育动态的计算机模型[J].中国农业气象,1989,10(3):3-10.
- [13] 冯利平,高亮之,金之庆,等.小麦发育期动态模拟模型的研究[J].作物学报,1997,23(4):418-424.
- [14] 张亚杰,李京,彭红坤,等.油菜发育期动态模拟模型的构建[J].作物学报,2015,41(5):766-777.
- [15] 王石立,马玉平.作物生长模拟模型在我国农业气象业务中的应用研究进展及思考[J].气象,2008,34(6):3-10.
- [16] 石春林,冯慧慧,金之庆,等.水稻发育期模型比较[J].中国水稻科学,2010,24(3):303-308.
- [17] 邹薇,刘铁梅,潘永龙,等.基于生理生态过程的大麦顶端发育和物候期模拟模型[J].生态学报,2009,29(2):815-823.
- [18] 王冀川,马富裕,冯胜利,等.基于生理发育时间的加工番茄生育期模拟模型[J].应用生态学报,2008,19(7):1544-1550.
- [19] 张明达,朱勇,胡雪琼,等.基于生理发育时间和生长度日的烤烟生育期预测模型[J].应用生态学报,2013,24(3):713-718.
- [20] 张明达,李蒙,胡雪琼,等.基于辐射积分法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量[J].生态学报,2013,33(22):7108-7115.
- [21] 熊应祥,谢永秀,宋启堃,等.六枝特区气象因子与水稻产量关系的研究[J].贵州农业科学,2009,37(10):79-81.
- [22] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P, et al. ORYZA2000: Modeling lowland rice[M].Los Baños: IRRI and Wageningen University,2001:235.
- [23] 朱勇.云南杂交水稻种植的气候条件及区划[J].云南农业大学学报,2000,15(1):34-37.
- [24] 薛光行,陈平,陈长利.水稻光敏不育临界日长估值的研究[J].中国农业科学,1998,31(3):19-24.
- [25] 许轲,孙圳,霍中洋,等.播期、品种类型对水稻产量、生育期及温光利用的影响[J].中国农业科学,2013(20):4222-4233.